

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТВЕРДЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПО МЕТОДУ РАЗРУШАЮЩЕЙСЯ ОБОЛОЧКИ

В. Г. Щетинин

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 117977 Москва

Метод разрушающейся оболочки, разработанный ранее для испытаний инициирующих взрывчатых веществ (ВВ), применен для исследования чувствительности к механическим воздействиям вторичных ВВ. Измерены критические давления возбуждения взрыва ряда ВВ (от азида свинца до тротила) с различным уровнем чувствительности. Получен относительный ряд критических давлений возбуждения взрыва, позволяющий сравнить чувствительность инициирующих и вторичных ВВ по результатам испытаний в рамках одного экспериментального метода.

Чувствительность взрывчатых веществ (ВВ) к механическим воздействиям определяет возможности и условия их практического применения. Проблема оценки механической чувствительности ВВ возникла одновременно с появлением мощных ВВ и в настоящее время по-прежнему актуальна. До сих пор в мировой практике в качестве стандартных испытаний механической чувствительности ВВ используются экспериментальные методы [1, 2], основанные на измерении частоты взрывов на копре при ударе грузом по навеске ВВ с некоторой стандартной массой. Принципиальный недостаток этих методов заключается в том, что частота взрывов является косвенной характеристикой механической чувствительности ВВ и зависит от конкретных условий испытания: массы навески ВВ, высоты сбрасывания груза, конструктивных особенностей испытательного прибора и т. д. [3]. По этой причине относительные ряды чувствительности для разных методов не совпадают, а оценка механической чувствительности твердых ВВ по частоте взрывов неоднозначна и противоречива.

Исследования механизма инициирования взрыва твердых ВВ в условиях копровых испытаний [3, 4] показывают, что при механических воздействиях возбуждение взрыва ВВ происходит в процессе пластической деформации ВВ за счет разогрева поверхностей трения. Максимальный разогрев трущихся тел [5–7] ограничен температурой их плавления, которая для вторичных ВВ при нормальных условиях не превышает 300 °С и значительно ниже температур очагового взрыва 400 ÷ 600 °С [3]. Поэтому для возбуждения взрыва ВВ при механиче-

ских воздействиях необходимо высокое давление, способное повысить температуру плавления ВВ (максимальную температуру механического разогрева) до температуры зажигания на поверхностях трения, образующихся при пластической деформации ВВ. Характерный наклон зависимости температуры плавления от давления для органических веществ, включая ВВ, составляет 150 ÷ 350 К/ГПа [8], и для повышения температуры плавления ВВ до температуры очагового взрыва необходимо давление $p > 1$ ГПа. При этом минимальное (критическое) давление, необходимое для возбуждения взрыва, как механический аналог критической температуры очагового взрыва является характеристикой чувствительности твердых ВВ к механическим воздействиям [3, 9]. Чтобы создать высокое давление в такой малопроходной среде, как ВВ (предел прочности $\approx 0,1$ ГПа [3]), и одновременно обеспечить возможность пластической деформации необходимы специальные условия. Наиболее простым и часто встречающимся на практике случаем реализации этих условий является сжатие тонкого слоя ВВ между жесткими телами, что используется при копровых испытаниях ВВ. Иницирование взрыва твердых ВВ в условиях копровых испытаний происходит при выдавливании (пластической деформации) слоя ВВ за счет упругой энергии, запасенной в сжатых элементах системы нагружения (наковальнях) и не зависит от способа создания начального давления (удар грузом или нагружение на прессе) [10].

Существующие методы измерения критического давления возбуждения взрыва (тензо-

метрический метод при ударе грузом на копре К-44-2 и копер на «трение» К-44-3 [3, 8]) сложны и требуют высококвалифицированного обслуживания. Кроме того, эти методы непригодны для испытаний инициирующих ВВ, так как обращение с высокочувствительными ВВ требует специальных мер безопасности. Существенно и то, что в отличие от бризантных ВВ взрыв образцов инициирующих ВВ протекает в режиме детонации и приводит к разрушению элементов испытательного оборудования, в частности, разрушает сложный и трудоемкий в изготовлении тензодатчик в тензометрическом методе измерения критических давлений при ударе грузом на копре [3].

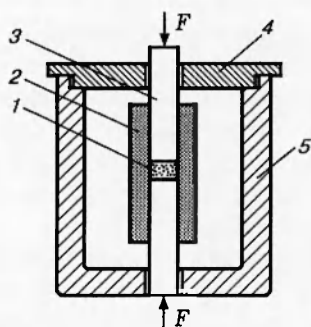
Для исследования механической чувствительности высокочувствительных ВВ был разработан метод, названный методом «разрушающейся оболочки» (РО), впервые позволивший измерить критическое давление возбуждения взрыва инициирующих ВВ [11]. Дальнейший опыт работы показал, что в доступном для этого метода диапазоне давлений возможно инициирование взрыва не только первичных, но и вторичных ВВ. В данной работе приведены результаты измерения методом РО критических давлений возбуждения взрыва ряда вторичных ВВ и дано их сравнение с критическими давлениями инициирующих ВВ, полученными в рамках одного экспериментального метода.

При использовании метода РО образец ВВ нагружается давлением на гидравлическом прессе через стальные пуансоны в цилиндрической тонкостенной оболочке (трубке), играющей роль малопрочной прессформы. На начальном этапе нагружения происходит прессование образца, а затем, при достижении некоторого давления, система образец — оболочка разрушается. При разрушении образец ВВ выдавливается (пластически деформируется) в радиальном направлении под действием упругосжатых пуансонов, и если давление в системе перед ее разрушением превышает критическое давление возбуждения взрыва исследуемого ВВ, разрушение системы сопровождается взрывом, и наоборот. Несущая способность (давление разрушения) всей системы складывается из несущей способности образца ВВ в форме диска, обратно пропорциональной толщине ВВ [3] (или, что то же самое, массе навески ВВ), и из боковой поддержки со стороны оболочки, пропорциональной толщине ее стенки. Это позволяет в каждом испытании изме-

нить давление разрушения, увеличивая его за счет уменьшения массы навески ВВ и/или увеличения толщины стенки оболочки, и наоборот. Для испытаний необходим набор одноразовых оболочек с различными толщинами стенки. Цель испытаний методом РО — определение критического давления возбуждения взрыва исследуемого ВВ.

Для возбуждения взрыва ВВ при медленных, как в методе РО, механических воздействиях необходимо, чтобы за начальным этапом статического нагружения следовала стадия быстрого выдавливания образца ВВ со скоростью, близкой к скорости свободной разгрузки торцов пуансонов (≈ 10 м/с) [10]. Такой режим можно обеспечить лишь при использовании оболочек из хрупкого материала. Как показала проверка, этой цели удовлетворяет оргстекло — доступный, дешевый и легко обрабатываемый материал. Оболочка из оргстекла обеспечивает боковую поддержку образцу ВВ до разрушения, а в момент разрушения раскалывается по всей длине в результате образования продольной сквозной трещины. Затем под действием выдавливаемого образца ВВ она раскрывается до образования второй продольной трещины с противоположной стороны и разлетается в виде двух одинаковых по размеру частей. Появление сквозной продольной трещины в момент разрушения приводит к полной потере несущей способности оболочки (инерционным сопротивлением разлетающейся оболочки можно пренебречь), и образец ВВ быстро выдавливается в радиальном направлении под действием упругосжатых пуансонов аналогично тому, как это происходит при ударе грузом на копре или после бокового сдвига одного из пуансонов на копре на «трение» К-44-3 [10]. Оболочки из других материалов (эбонит, текстолит, сталь, чугун) при нагружении расширяются без образования продольной трещины и сохраняют свою несущую способность, а образец ВВ медленно выдавливается со скоростью движения поршня пресса ($< 10^{-3}$ м/с) в зазор, образовавшийся между пуансонами и оболочкой, и не взрывается во всем доступном диапазоне давлений (диапазон давлений в методе РО ограничен пределом прочности пуансонов, который для использованных в данной работе пуансонов из стали У8, закаленных до RC60, составляет $1,6 \div 1,8$ ГПа).

В испытаниях по методу РО (рисунок) порошок ВВ массой, как правило, не более 0,1 г



Конструкция испытательного прибора в опытах, проведенных по методу РО:

1 — образец ВВ, 2 — оболочка из оргстекла, 3 — стальные пуансоны, 4 — крышка, 5 — защитный стакан

засыпается в оболочку (трубку) из оргстекла и с двух сторон закрывается пуансонами. Закупоренный образец нагружается давлением на гидравлическом прессе со скоростью, задаваемой скоростью движения поршня прессы. Нагружение осуществляется до разрушения системы заряд — оболочка, что сопровождается резким спадом давления и звуковым эффектом — треском при отсутствии взрыва и хлопком при взрыве образца ВВ. Давление разрушения (усилие прессы перед разрушением, отнесенное к площади сечения пуансона) определяется по показаниям манометра прессы в начальный момент резкого сброса давления в его гидравлической системе. Для определения критического давления возбуждения взрыва исследуемого ВВ проводится серия испытаний, в каждом из которых давление разрушения уменьшается или увеличивается (по сравнению с результатом предыдущего испытания) за счет изменения массы навески ВВ и/или изменения толщины используемой оболочки. В частности, если в первом испытании разрушение системы образец — оболочка сопровождалось взрывом, то в последующих испытаниях необходимо уменьшать давление разрушения до тех пор, пока разрушения перестанут сопровождаться взрывом образца и, наоборот. За критическое давление принимается граница, выше которой в серии экспериментов все разрушения системы сопровождаются взрывом ВВ.

Для ограничения разлета осколков оболочки при взрыве ВВ систему образец — оболочка помещали в стальной стакан с крышкой (см. рисунок) и центрировали сквозными отверстиями для пуансонов на дне стакана и в крышке.

На крышке имелись дополнительные отверстия для выпуска газообразных продуктов взрыва. Для уменьшения массы навески и мощности взрыва образцов ВВ диаметр пуансонов и внутренний диаметр трубки уменьшен до 5 мм по сравнению с диаметром цилиндрических наковален (10 мм) при копровых испытаниях. Опыт применения метода РО показал, что для обеспечения боковой поддержки во всем диапазоне давлений разрушения ($0 \div 16$ ГПа) достаточно использовать трубки из оргстекла, изготовленные на токарном станке, с толщиной стенки 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 мм и длиной 15 мм. Длина пуансонов, как и в копровых методах, составляла 25 мм, что обеспечивало аналогичные с копровыми условия возбуждения взрыва (критическое давление возбуждения взрыва зависит от длины упругих элементов (пуансонов) системы нагружения [10]). В работе использовался гидравлический пресс от копра К-44-3 с диаметром поршня 110 мм и максимальным усилием 15 т, у которого, в отличие от использованного в [11] «школьного» прессы, практически отсутствуют потери передаваемого усилия за счет трения в узле уплотнения поршня (по крайней мере, в том диапазоне давлений, где проводили измерения).

Слабым местом копровых испытаний ВВ является обнаружение взрыва образца, особенно для ВВ с низкой способностью к распространению взрывчатого превращения. Приходится использовать такие субъективные факторы, как звуковой эффект или пламя [2], или применять сложную систему фоторегистрации вспышки при взрыве ВВ [10]. При использовании метода РО надежным критерием взрыва служит характер разрушения оболочки. При отсутствии взрыва оболочка разрушается на два одинаковых фрагмента, при взрыве — дробится на множество осколков в продольном и поперечном направлениях, и наличие хотя бы нескольких осколков, раздробленных в поперечном направлении, надежно свидетельствует о возбуждении взрыва в образце.

В таблице приведены значения критических давлений возбуждения взрыва, измеренные методом РО, данные для иницирующих ВВ взяты из [11]. (В работе [11] по вине авторов указано ошибочное значение критического давления для азиды свинца. В таблице эта ошибка исправлена). Для сравнения в таблице приведены значения критических давлений на верхнем пределе по частоте взрывов, полученные

ВВ	$p_{кр}^{PO}$, ГПа	$\bar{p}_{кр}^{уд}$, ГПа	$\frac{p_{кр}^{PO}}{p_{кр}^{уд}}$	$p_{кр}$, ГПа
Тетразен	$0,07 \pm 0,005$	—	—	0,14
Гремучая ртуть	$0,2 \pm 0,01$	—	—	0,4
Азид свинца	$0,38 \pm 0,03$	0,26 [3]	1,46	$0,76 \div 0,78$
Бис-(2-дифтораминадинитроэтил)нитрамин	$0,42 \pm 0,02$	—	—	0,84
Октанитро-3,6-диазаоктан	$0,79 \pm 0,02$	0,52	1,52	$1,58 \div 1,56$
Тэн	$0,93 \pm 0,03$	0,64	1,45	$1,86 \div 1,92$
Октоген	$1,0 \pm 0,03$	0,68	1,47	$2,0 \div 2,04$
Гексоген	$1,15 \pm 0,03$	0,8	1,44	$2,3 \div 2,4$
Тротил	$1,35 \pm 0,03$	1,06	1,27	$2,7 \div 3,18$

в данной работе с помощью тензометрического метода при ударе на копре К-44-2. Значения критических давлений в методе РО измерены с обычной для исследований чувствительности точностью $5 \div 10$ %. Ошибка измерений определяется, в основном, размером интервала между максимальным давлением разрушения без взрыва и ближайшим к нему сверху давлением разрушения со взрывом (половина этого интервала приведена в таблице в качестве ошибки измерений для каждого ВВ). Как показала практика, для определения критического давления с указанной выше точностью достаточно $5 \div 10$ испытаний. При необходимости можно уменьшить этот интервал и, соответственно, величину ошибки измерений за счет увеличения числа испытаний. Как видно из таблицы, относительные ряды критических давлений, измеренных двумя методами, полностью совпадают по порядку расположения веществ и совпадают с порядком расположения их в опорном ряду (инициирующие ВВ, тэн, октоген, гексоген, тротил [3]), построенном на основе известной из практики относительной чувствительности ВВ.

В таблице приведены средние (по площади образца ВВ) значения критических давлений, полученные в результате деления измеряемого в эксперименте усилия внешнего тела (падающего груза или поршня пресса) на площадь поверхности диска ВВ. Однако за возбуждение взрыва ответственны реальные давления в ВВ, которые отличаются от средних из-за распределения давления, возникающего вследствие контактного трения на поверхностях образца. Отличие по абсолютной величине приведенных в

таблице критических давлений для двух методов испытаний, вероятно, связано с различным характером распределения давления в деформируемом образце ВВ для различных схем нагружения. При нагружении тонкого диска ВВ на наковальнях со свободной боковой поверхностью (боковая поддержка отсутствует и работает только контактное трение, подобные условия нагружения реализуются при ударе грузом на копре) возникает радиальное распределение давления с максимумом в центре диска, который в три раза выше среднего давления [3, 12], и реальное критическое давление возбуждения взрыва при ударе на копре также в три раза выше, чем средние значения в соответствующей колонке таблицы. В другом предельном случае, когда контактное трение на торцах заряда несущественно по сравнению с боковой поддержкой со стороны оболочки (высокий заряд в прочной прессформе), распределение давления практически исчезает и соотношение между максимальным и средним значениями давления становится равным единице. При использовании метода РО реализуется промежуточный случай, когда контактное трение и боковая поддержка вносят соизмеримый вклад в несущую способность системы образец — оболочка и, следовательно, соотношение между максимальным и средним давлениями в образце должно иметь промежуточное значение между 1 и 3 (≈ 2). Если реальные критические давления возбуждения взрыва ВВ в исследованиях методом РО и при ударе на копре одни и те же, то средние значения критического давления должны быть в 1,5 раза больше, чем соответствующие значения при ударе на копре. Как

видно из предпоследней колонки таблицы, отношение экспериментальных значений критических давлений для двух методов хорошо согласуется с указанным выше значением 1,5. В последней колонке таблицы приведены реальные критические давления возбуждения взрыва, полученные умножением средних по площади значений, определенных методом РО, на коэффициент 2 (первое значение в колонке) и умножением на коэффициент 3 для удара на копре (второе значение в колонке).

Из таблицы видно, что инициирующие и вторичные ВВ имеют достаточно близкую способность к возбуждению взрыва. В частности, критическое давление возбуждения взрыва для тэна примерно вдвое больше, чем для азид свинца. Более того, некоторые вторичные ВВ вплотную приближаются по этой характеристике к инициирующим ВВ. Тем не менее между этими классами ВВ существует вполне определенная граница, которая определяется не их чувствительностью, а способностью к быстрому переходу от воспламенения к детонации на коротких базах (в пределах размера прессованного заряда инициирующего ВВ в капсуле-детонаторе). По этой причине при испытании инициирующих ВВ методом РО во всех опытах со взрывом последний переходил в детонационный режим, о чем свидетельствовали расплюснутые или раздробленные торцы пуансонов. Для вторичных ВВ переход горения в детонацию возможен только в специальных условиях (высокопористый заряд в прочной оболочке) с большим размером зоны перехода. Поэтому взрывы вторичных ВВ, как и при копровых испытаниях, происходили в форме горения без характерного для детонации дробящего эффекта. Среди всех вторичных ВВ в таблице только образцы наиболее чувствительного из них (бис-(2-дифтораминадинитроэтил)нитрамин) иногда взрывались в детонационном режиме (в $\approx 50\%$ опытов со взрывом). Однако отсутствие детонации в половине опытов со взрывом свидетельствует о том, что и это вещество, вероятно, не относится к классу инициирующих ВВ, хотя и обладает высокой способностью к распространению взрывчатого превращения и переходу горения в детонацию.

При анализе данных таблицы следует учитывать, что полная механическая чувствительность ВВ определяется не только способностью к возбуждению взрыва, характеристикой которой является критическое давление, но и

способностью к распространению взрывчатого превращения, характеристикой которой служит критический диаметр детонации (минимальный размер заряда ВВ, способного детонировать). С учетом более высокой детонационной способности инициирующих ВВ различие инициирующих и вторичных ВВ по полной механической чувствительности гораздо больше, чем по критическому давлению возбуждения взрыва [3].

Применение метода РО для испытаний вторичных ВВ показало, что он пригоден для исследования чувствительности к механическим воздействиям твердых ВВ с любым уровнем чувствительности. В отличие от тензометрических измерений при ударе на копре этот метод позволяет находить критические давления возбужденного взрыва ВВ с помощью более простых средств и с меньшими затратами времени, труда и количества ВВ. Многочисленные испытания одних и тех же ВВ (азид свинца, тэн, октоген), проведенные в различное время на стадии доработки метода РО и адаптации его для вторичных ВВ, показали совпадение значений критического давления для каждого ВВ в пределах ошибки измерений, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости результатов измерений. При этом не обнаружено влияние таких факторов, как длина оболочки (в пределах длины $15 \div 30$ мм), качество изготовления ее внутренней поверхности, чистота обработки торцов пуансонов, а также соотношение между массой навески (высота образца в оболочке) и толщиной стенки оболочки. В качестве практической рекомендации следует отметить, что допуски на диаметры пуансона и канала оболочки должны соответствовать скользящей посадке (отсутствие зазора между пуансоном и оболочкой). Наличие зазора между пуансонами и оболочкой не изменяет результатов измерений, но делает непредсказуемым результат каждого опыта и, соответственно, увеличивает число необходимых испытаний вследствие того, что в процессе нагружения образец ВВ частично выдавливается в зазор, его высота уменьшается, а несущая способность образца и давление разрушения возрастают непредсказуемым образом.

Наиболее эффективным оказалось использование метода РО для исследования ВВ с повышенной чувствительностью (с критическим давлением возбуждения взрыва до $\approx 0,6 \div 0,8$ ГПа), для которых, как показал опыт рабо-

ты, в условиях испытаний методом РО отсутствует частота взрывов.

Частота взрывов, вероятно, связана с особенностью поведения образца ВВ в форме тонкого диска (плохая прессовка при изготовлении образца [13] и тепловая неустойчивость на стадии пластической деформации [14]) при $h/D \ll 1$ (h и D — высота и диаметр диска). Несущая способность системы образец — оболочка в нижней части диапазона давлений при измерениях по методу РО ($0 \div 1,6$ ГПа) в значительной степени обеспечивается боковой поддержкой оболочки. При этом высота образца ВВ, необходимая для достижения давления разрушения, достаточно большая ($h/D \leq 1$) и для ВВ с критическим давлением из нижней части диапазона отсутствует частота взрывов.

В верхней части диапазона давлений вклад боковой поддержки оболочки из оргстекла становится незначительным и для достижения давления разрушения приходится использовать малые навески ВВ (образцы ВВ в виде тонкого слоя $h/D \ll 1$), что вероятно, и приводит к появлению частоты взрывов. Последнее при испытании методом РО вторичных ВВ с критическим давлением, как у тэна и выше, приводит к увеличению числа опытов для определения критического давления на верхнем пределе частоты взрывов до того же уровня (несколько десятков), что при ударе на копре. Однако и в этом случае вследствие своей простоты метод РО выглядит более предпочтительным по сравнению с другими методами измерения критического давления возбуждения взрыва.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Manual Tests and Criteria.** Second revised editions United Nations. New York; Geneva, 1995.
2. **Вещества взрывчатые. Методы определения чувствительности к удару.** ГОСТ 4545-80. М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1981.
3. **Афанасьев Г. Т., Боболев В. К.** Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
4. **Афанасьев Г. Т., Боболев В. К., Карабанов Ю. Ф., Щетинин В. Г.** Разрушение и иницирование тонкого слоя ВВ при ударе // *Физика горения и взрыва*. 1975. Т. 11, № 3. С. 467–475.
5. **Сухих В. А., Харитон Ю. Б.** Возникновение вспышек во взрывчатом веществе при кратковременных деформациях // *Вопросы теории взрывчатых веществ*. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. Вып. 1. С. 149–154.
6. **Боуден Ф. Ф., Иоффе А. Д.** Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
7. **Щетинин В. Г.** Оценка разогрева твердых тел на поверхности трения // *Хим. физика*. 1983. Т. 19, № 5. С. 688–692.
8. **Физические величины: Справочник /** Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
9. **Щетинин В. Г.** Критические условия возбуждения взрыва твердых взрывчатых веществ // *Докл. АН СССР*. 1981. Т. 258, № 4. С. 865–867.
10. **Афанасьев Г. Т., Долгов В. И., Щетинин В. Г.** Иницирование взрыва при взаимодействии упругой волны в ударнике с квазистатической деформацией заряда // *Детонация*. Черноголовка, 1978. С. 41–45.
11. **Афанасьев Г. Т., Боболев В. К., Долгов В. И. и др.** К механической чувствительности иницирующих взрывчатых веществ // *Горение и взрыв: Материалы Четвертого всесоюз. симпоз. по горению и взрыву*. М.: Наука, 1977. С. 485–489.
12. **Качанов Л. М.** Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969.
13. **Афанасьев Г. Т., Боболев В. К., Долгов В. И.** Возбуждение взрыва твердых ВВ при деформации в замкнутом объеме // *Физика горения и взрыва*. 1969. Т. 5, № 4. С. 486–491.
14. **Дубовик А. В.** Тепловая неустойчивость осевой деформации пластического слоя и оценка критических давлений иницирования твердых ВВ при ударе // *Физика горения и взрыва*. 1980. Т. 16, № 4. С. 103–109.

*Поступила в редакцию 9/VI 1998 г.,
в окончательном варианте — 24/II 1999 г.*